

Analisis Dinamik Fondasi Mesin Generator Sets pada Power House Building Project Lube Oil Blending Plant

Isti Radhista Hertiany¹⁾, Hary Christady Hardiyatmo²⁾, Fikri Faris³⁾

^{1),2),3)}Departmen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
Bulaksumur, Yogyakarta, Indonesia Kode Pos 55281

Email: [^{1\)}isti.radhista.h@mail.ugm.ac.id](mailto:isti.radhista.h@mail.ugm.ac.id), [^{2\)}hary.chistady@mail.ugm.ac.id](mailto:hary.chistady@mail.ugm.ac.id), [^{3\)}fikri.faris@mail.ugm.ac.id](mailto:fikri.faris@mail.ugm.ac.id)

ABSTRACT

Generator set machine foundations in the Power House Building Project Lube Oil Blending Plant is located on Cilegon Industrial Estate Area (KIEC), Banten. Machine foundation is analyzed in three conditions to check the safety condition against the dynamic load. The first condition is the existing condition where the block foundation is not embedded in the ground. From the results of the analysis of this condition, the natural frequency value is 20,077 Hz. It is very close to frequency of machine foundation, although it is safe from resonance. The vertical and horizontal amplitude is safe because smaller than permission amplitude. In the second condition, the effect of the embedded block foundation is checked, the smaller natural frequency value 13,305 Hz is safe against resonance. The amplitude value obtained is also smaller. In the last condition analyzed the embedded block foundation without using piles to determine the effect of piles during the machine foundation system. Although the results of the analysis obtained a smaller natural frequency value of about 10,628 Hz but seen from its value of vertical and horizontal amplitude, the foundation without pile is not safe. In general, it can be concluded that the existing foundation is safe from dynamic load, but it would be better if the foundation of the block is embedded on the ground. The use of piles can reduce the amplitude value of machine foundation.

Keywords : machine foundation, dynamic analysis, generator sets

ABSTRAK

Fondasi mesin generator sets pada Power House Building Project Lube Oil Blending Plant berlokasi di Kawasan Industrial Estate Cilegon (KIEC), Banten. Analisis fondasi mesin dilakukan dengan tiga kondisi untuk mengecek keamanan fondasi terhadap beban dinamik. Kondisi pertama adalah kondisi eksisting dimana fondasi blok tidak tertanam dalam tanah. Dari hasil analisis kondisi ini didapatkan nilai frekuensi natural 20,077 Hz. Frekuensi natural tanah ini mendekati nilai frekuensi mesin, walaupun masih saman dari resonansi. Nilai amplitudo vertikal dan amplitudo horizontal aman karena lebih kecil dari nilai amplitudo izin. Pada kondisi kedua dicek pengaruh fondasi blok tertanam dan dihasilkan nilai frekuensi natural yang lebih kecil yakni 13,305 Hz dan aman terhadap resonansi. Nilai amplitudo yang didapat juga lebih kecil. Pada kondisi terakhir dianalisis fondasi blok tertanam tanpa menggunakan pile untuk mengetahui pengaruh pile pada sistem fondasi mesin. Walaupun dari hasil analisis didapat nilai frekuensi natural yang lebih kecil yakni sekitar 10,628 Hz, namun dilihat dari nilai amplitudo vertikal dan amplitudo horizontalnya, fondasi tanpa pile ini tidak aman. Secara umum dapat disimpulkan bahwa fondasi eksistingaman terhadap gaya dinamik, namun akan lebih baik jika fondasi blok tertanam dalam tanah. Penggunaan pile mampu memperkecil nilai amplitudo pada fondasi mesin.

Kata kunci : Fondasi mesin, analisis dinamik, generator sets

1. Pendahuluan

Pada dasarnya beban yang diterima oleh struktur akan ditumpu oleh fondasi yang mentransfer beban ke dalam tanah dasar. Beban struktur tersebut biasanya merupakan beban statik (diam). Pada bangunan sipil yang didalamnya terdapat mesin yang terus bergerak, bebannya akan didominasi oleh beban dinamis. Desain dari fondasi mesin ini jauh lebih kompleks dibandingkan dengan fondasi yang hanya menerima beban statis.

Pada umumnya, fondasi mesin memiliki berat lebih dibanding dengan fondasi biasa dan beban dinamik yang ditimbulkan oleh elemen penggerak pada mesin memerlukan perhatian khusus. Pada fondasi mesin, beban dinamik bekerja pada waktu yang relatif lama, terutama pada saat mesin beroperasi. Dengan demikian, perilaku tanah harus elastik dengan deformasi yang minimal. Dua parameter yang harus diperhatikan pada perencanaan fondasi mesin adalah amplitudo getaran mesin saat operasi dan *natural frequency* (frekuensi alami) sistem tanah-fondasi-mesin.

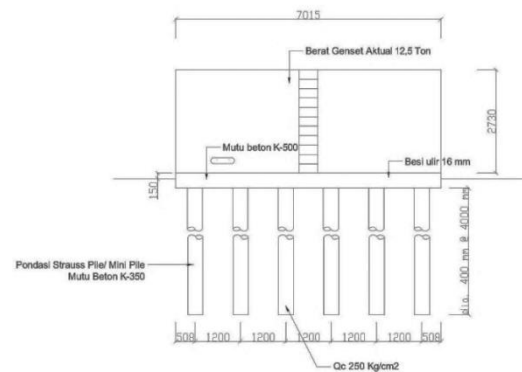
Pada kasus di lapangan, fondasi mesin generator set (genset) memiliki frekuensi 1500 rpm yang masuk ke kategori *very high frequencies*. Mesin ini ditumpu oleh fondasi jenis *block* dengan ditambahkan *mini pile*. Perencanaan fondasi mesin harus dilakukan sebaik mungkin agar desain fondasi yang direncanakan tidak mengakibatkan berbagai masalah seperti keretakan lantai maupun terjadinya getaran yang dapat menimbulkan kerusakan pada mesin. Berdasarkan hal tersebut dilakukan studi kasus mengenai fondasi mesin yang menumpu mesin *generator set* (genset) pada *Power House Building Project Lube Oil Blending Plant*.

Dari latar belakang tersebut, maka dilakukanlah analisis dinamik fondasi mesin yang mengangkat permasalahan sebagai berikut: cara menentukan parameter dinamik tanah berupa modulus geser dan rasio redaman yang digunakan dalam desain fondasi mesin, penerapan metode Lumped Parameter System untuk menganalisis resonansi dan amplitudo pada struktur fondasi mesin, keamanan desain eksisting fondasi blok tidak tertanam dengan *strauss pile* berdasar analisis dinamik, pengaruh fondasi blok yang tertanam dengan *strauss pile* pada sistem fondasi mesin, pengaruh pile dalam desain sistem fondasi mesin tipe blok tertanam.



Gambar 1. Fondasi Mesin Genset Lube Oil

Blending Plant, Cilegon



Gambar 2. Detail Fondasi Mesin Genset

A. Analisis dan Desain Fondasi Mesin

Fondasi mesin secara umum memiliki enam derajat kebebasan dan enam frekuensi alami. Solusi matematis untuk *displacement* pada fondasi mesin dapat ditempuh dengan menganggap tanah sebagai material viskoelastik. Parameter getaran fondasi dapat dievaluasi dengan menganggap tanah sebagai material yang memiliki kekakuan/ sebagai pegas (*spring*) dan memiliki redaman (*dashpot/ viscous damping*). (Das, 1993)

B. Penentuan Parameter Statik dan Dinamik Tanah

Dalam desain fondasi mesin, terdapat beberapa parameter dinamis tanah yang harus diperhatikan dan dicari terlebih dahulu. Teori *lumped parameter system* menyatakan pengambilan nilai modulus geser (*shear modulus*) G & angka poisson (μ) dengan pengujian laboratorium maupun korelasi dari pengujian lapangan. Nilai G dan μ bisa didapat dari uji *Triaxial Unconsolidated Undrained* (Triaksial UU), maupun dikorelasikan dengan pendekatan rumus empiris dari beberapa penelitian terdahulu dari hasil uji sondir atau *Cone Penetration Test* (CPT). Nilai G dan μ akan berpengaruh pada kekakuan pegas tanah di berbagai mode getaran.

1. Penentuan Modulus Geser Tanah Lempung

Hardin dan Drnevich (1972) mengusulkan prosedur umum untuk menentukan modulus geser (G) berdasarkan berbagai eksperimen. Hubungan tegangan-regangan geser dapat dilihat pada Persamaan 1.1 hingga Persamaan 1.3.

$$\tau = \left(\frac{1}{G_{max}} \right) \gamma + \left(\frac{\gamma}{G_{max}} \right) \quad (1.1)$$

$$G_{max} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_r} \quad (1.2)$$

$$\gamma_r = \frac{\tau_{max}}{G_{max}} \quad (1.3)$$

dengan:

τ = tegangan geser

γ = regangan geser

γ_r = regangan geser referensi

τ_{max} = tegangan geser maksimum pada keruntuhan

G_{max} = modulus geser maksimum pada keruntuhan

Hubungan antara modulus geser maksimum dengan angka pori dan *overconsolidated ratio* (OCR) diekspresikan pada Persamaan 1.4 hingga Persamaan 1.6.

$$G_{max} = 3230 \frac{(2,973-e)^2}{(1+e)} (OCR)^K (\sigma_o')^{1/2} \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad (1.4)$$

$$\sigma_o' = \frac{1}{3} (\sigma_v' + 2K_o \sigma_v') \quad (1.5)$$

$$K_o = 0,44 + 0,42 (PI, 100) \quad (1.6)$$

dengan:

e = angka pori

OCR = rasio *overconsolidated*

K = konstanta yang bergantung pada nilai PI

σ_o' = tegangan kekang tanah diam (kN/m²)

σ_v' = tegangan vertikal efektif (kN/m²)

K_o = koefisien tanah saat diam (*at rest*)

φ = sudut gesek dalam tanah (°)

PI = indeks plastisitas (%)

Persamaan untuk tegangan geser (τ_{max}) dapat diturunkan seperti pada Persamaan 1.7.

$$\tau_{max} = \left\{ \left[\frac{1}{2} (1 + K_o) \sigma_v' \sin \varphi \cos \varphi \right]^2 - \left[\frac{1}{2} (1 - K_o) \sigma_v' \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (1.7)$$

Karena nilai G_{max} dan τ_{max} telah diketahui, maka γ_r dapat dicari dari Persamaan 1.2. Persamaan empirik lainnya untuk pengecekan nilai γ_r tanah lempung adalah $\frac{\gamma_r}{(\sigma_v')^{1/2}}$ dan dikorelasikan dengan tabel Hardin dan Drnevich (1972).

Pada tanah sesungguhnya di lapangan, nilai tegangan referensi pasti mengalami penyimpangan, sehingga nilainya perlu dikoreksi dengan faktor regangan hiperbolik seperti pada Persamaan 1.8 dan Persamaan 1.9.

$$\gamma_h = \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right) \left[1 + a e^{-b \left(\frac{\gamma}{\gamma_r} \right)} \right] \quad (1.8)$$

$$G = \frac{G_{max}}{(1 + \gamma_h)} \quad (1.9)$$

dengan:

a dan b = konstanta hiperbolik regangan

Jika di lapangan dilakukan pengujian sondir, Rix dan Stokoe (1991) mengusulkan nilai G_{max} seperti pada Persamaan 1.10.

$$G_{max} = 1634 q_c^{0,25} \sigma_v'^{0,375} \text{ (dalam satuan kPa)} \quad (1.10)$$

dengan:

q_c = kuat tekan konus (kN/m²)

σ_v' = tegangan *overburden* efektif tanah (kN/m²)

Dalam permasalahan geoteknik, analisis dinamik dibedakan menjadi dua yakni analisis dinamik respon

amplitudo regangan besar (dapat berupa ledakan dan beban gempa), serta analisis dinamik respon amplitudo regangan kecil (kasus fondasi mesin). Menurut Hammam & Eliwa (2013), untuk respon amplitudo regangan kecil, nilai G_{max} juga dapat dicari dari Persamaan 1.11.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (1.11)$$

dengan:

ρ = rapat massa tanah (mg/m³)

V_s = kecepatan geser gelombang /(m/s)

N = nilai rata-rata N-SPT

Beberapa peneliti mengusulkan nilai V_s dari hasil uji lapangan. Menurut Imai dan Yoshimura (1975), V_s dapat dicari dengan Persamaan 1.12. Persamaan menurut Jinan (1987) dapat dilihat pada Persamaan 1.13. Menurut Hasancebi dan Ulusay (2007) V_s didapat dari Persamaan 1.14.

$$V_s = 76 N^{0,33} \quad (1.12)$$

$$V_s = 116,1 (N + 0,3185)^{0,202} \quad (1.13)$$

$$V_s = 90 N^{0,309} \quad (1.14)$$

2. Penentuan Angka Poisson

Kisaran nilai angka poisson dan modulus elastisitas dipengaruhi oleh jenis tanah, dan diambil dari tabel Bowles (1984).

3. Keamanan Fondasi Mesin dilihat dari Amplitudo Izin dan Resonansinya

Menurut Srinavasulu (1976), jenis beban dinamis fondasi genset adalah *steady-state loads* dimana beban bervariasi menurut waktu mengikuti hukum sinus/cosinus. Nilai amplitudo izin adalah 0,004-0,006 cm untuk getaran vertikal dan 0,007-0,009 untuk getaran horizontal. Dalam mendesain pondasi mesin, Bowles (1982) menyarankan agar frekuensi resonansi dari sistem fondasi-tanah harus lebih kecil dari setengah frekuensi operasi mesin ($F_{resonansi} < 0,5 F_{mesin}$) untuk mesin lebih dari 1000 rpm. Frekuensi alami dari pondasi dapat dikurangi dengan menaikkan massa sistem (m) dengan mengurangi luas sentuh dasar (r_b) dan dengan mengurangi modulus geser (G) yang berfungsi sebagai konstanta pegas/spring.

C. Perencanaan Fondasi Mesin Ditinjau Dari Beban Dinamis

Pada fondasi mesin biasanya terjadi berbagai macam jenis perpindahan atau *rigid body displacement*. Perpindahan tersebut masing-masing harus dianalisis model getarannya, seperti: *vertical vibration*, *sliding vibration*, dan kombinasi antara *rocking and crossing mode of vibration*. Pada pendekatan *Lumped Parameter Vibrating System* atau *mass-spring-dashpot system* parameter utama yang harus dicari adalah massa total fondasi dan mesin, kekakuan (*stiffness*) sebagai *spring*, dan redaman (*viscousdamping*) sebagai *dashpot*. Oleh karena itu, parameter seperti kekakuan dan redaman dianalisis dengan mempertimbangkan keduanya. Persamaan yang digunakan adalah persamaan untuk tanah lempung analisis *end bearing*.

2. Pembahasan

Untuk mendapatkan analisis yang tepat, diperlukan berbagai data penunjang. Data tersebut diantaranya data tanah, spesifikasi genset, serta denah fondasi mesin. Data tanah yang diperlukan diantaranya jenis tanah, indeks properties tanah, serta parameter statis dan parameter dinamis tanah. Data tersebut digunakan untuk memperkirakan kondisi tanah dibawah fondasi serta kekuatannya. Data tanah didapat dari uji lapangan langsung dan uji laboratorium.

A. Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium yang dilakukan antara lain: uji kadar air (ASTM D-2216-71), uji berat jenis (ASTM D854-58), uji batas atterberg (ASTM D423-66), *grain size analysis* (ASTM D422-72), hidrometer (ASTM D421-72), dan uji triaksial UU (ASTM D2850-95). Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Rangkuman Hasil Pengujian Laboratorium

No.	Pengujian	Hasil	Nilai
1.	Uji kadar air (water content)	Kadar air (ω)	24,85%
2.	Uji berat jenis (specific gravity)	Berat jenis (Gs)	2,57
3.	Uji saringan dan hidrometer	Jenis tanah	Pasir berlempung (SC)
4.	Uji batas atterberg	Batas cair (LL)	41,10%
		Batas plastis (PL)	25,14%
		Indeks Plastisitas (PI)	15,96%
5.	Uji Triaksial UU	Sudut gesek dalam (ϕ)	4,64o
		Kohesi (c)	50,74 kN/m3

B. Pengujian Lapangan

Pada proyek *Lube Oil Blending Plant* ini, pengujian langsung di lapangan dilakukan dengan uji sondir. Titik sondir terdekat yang mewakili area gedung genset adalah titik sondir S7, S8, S9, dan S10. Rangkuman hasil uji sondir dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Hasil Uji Sondir Maksimum

Titik Pengujian	Kedalaman Pengujian (h) (m)	maks. Max. Resistance (qc) (kg/cm ²)
S7	2,60	250
S8	3,60	250
S9	3,40	250
S10	3,00	250

Tabel 3. Perlapisan Tanah berdasarkan Uji Sondir

Kedalaman (m)	Nilai qc rata-rata (kg/cm ²)	Jenis tanah
0.00 – 1.00	40 - 100	Lanau kelepungan, konsistensi very stiff
1.00 – 2.50	10 - 25	Lanau kelepungan, konsistensi medium stiff

2.50 – 3.00	40 - 100	Lanau kelepungan, konsistensi very stiff
> 3.00	100-250	Lanau kelepungan, konsistensi very stiff

Data kedalaman, jenis tanah, dan kekuatan tanah tersebut selanjutnya dikorelasikan dengan data uji laboratorium sebagai pembandingan apakah data yang didapat telah valid. Secara umum, dapat disimpulkan bahwa tanah dasar fondasi genset merupakan jenis tanah lanau kelepungan yang memiliki 3 lapis konsistensi, yakni sangat kaku, sedang, dan sangat kaku. Namun secara umum, tanah dapat diasumsikan sebagai satu lapis tanah lanau kelepungan kaku dengan nilai qc rata-rata 100kg/cm².

C. Penentuan Nilai Angka Poisson dan Modulus Geser

Dalam permasalahan geoteknik, analisis dinamik dibedakan menjadi dua yakni analisis dinamik respon amplitudo regangan besar (dapat berupa ledakan dan beban gempa), serta analisis dinamik respon amplitudo regangan kecil (kasus fondasi mesin). Terdapat tiga parameter utama dalam desain analisis dinamik, yakni angka poisson (μ), modulus geser (G), dan redaman / *damping* (C). Angka poisson atau *poissons ratio* merupakan rasio kompresi poros terhadap regangan pemuaian lateral. Menurut Bowles (1984), hubungan jenis tanah dengan angka poisson dapat dilihat pada Tabel 3.3. Untuk jenis tanah SC (lempung berpasir) diambil nilai angka poisson (μ) sebesar 0,25.

Modulus geser tanah adalah perbandingan antara tegangan geser dan regangan geser dalam tanah. Untuk analisis fondasi mesin, modulus geser dapat dicari dengan beberapa persamaan empiris baik berdasarkan uji laboratorium maupun uji lapangan. Data yang diperlukan tergantung pada jenis tanah dibawah fondasi mesin. Pada umumnya, modulus geser merupakan fungsi dari angka pori (e) dan tegangan tanah (σ_v). Pada tanah lempung, nilai indeks plastisitas (PI) dan *overconsolidated ratio* (OCR) ikut mempengaruhi nilai modulus geser tanah lempung (Hardin dan Black, 1969). Sedangkan untuk tanah pasir, bentuk butiran juga akan mempengaruhi nilai modulus geser tanah pasir (Hardin dan Richart, 1963).

Tabel 4. Hasil Perhitungan Berbagai Nilai Modulus Geser Maksimum

No	Referensi	Nilai G_{max} (MPa)
1.	Rix dan Stokoe (1991)	7,144
2.	Hardin & Drnevich (1972)	7,992
3.	Imai & Yoshimura (1975)	8,666
4.	Jinan (1987)	8,917
5.	Hasancebi & Ulusay (2007)	10,617

Dari Tabel 4 didapatkan bahwa nilai G_{max} terkecil didapat dari persamaan Rix dan Stokoe (1991) dengan nilai 7,144 MPa, sedangkan nilai G_{max} terbesar adalah persamaan Hasancebi & Ulusay (2007) dengan nilai 10,617 MPa. Untuk perhitungan fondasi mesin dipilih nilai $G_{max} = 7,144$ MPa.

D. Analisis Dinamik Fondasi Mesin

Rumusan yang digunakan analisis fondasi mesin ini berdasarkan usulan Novak dan El-Sharnouby (1983). Pertama, harus ditentukan apakah fondasi tiang termasuk kategori *end bearing pile* atau *floating pile*. Karena data sondir dengan kedalaman rata-rata 4 m menunjukkan sudah masuk jenis tanah keras dengan $q_c = 250 \text{ kg/cm}^2$, maka dipilih analisis *end bearing pile*. Selanjutnya, dicari nilai kekakuan dan redaman tiang tunggal, kekakuan dan redaman grup tiang, kekakuan dan redaman *pile cap*, serta kekakuan dan redaman total tiang. Rangkuman perhitungan untuk seluruh *mode of vibration* dapat dilihat pada Tabel 5 hingga Tabel 8.

Tabel 5. Rangkuman Nilai Kekakuan dan Redaman Mode Vertikal

Mode Vertikal	Stiffness Coefficient (ton/meter)	Damping Coefficient (ton-detik/meter)
Single pile	$k_z = 1,194 \times 10^5$	$c_z = 1,914 \times 10^2$
Group pile	$k_{z(p)} = 3,622 \times 10^5$	$c_{z(p)} = 5,807 \times 10^2$
Pile Cap	$k_{z(z=0)} = 0$	$c_{z(z=0)} = 0$
Total	$k_{z(r)} = 3,622 \times 10^5$	$c_{z(r)} = 5,807 \times 10^2$

Tabel 6. Rangkuman Nilai Kekakuan dan Redaman Mode Translasi

Mode Translasi	Stiffness Coefficient (ton-meter)	Damping Coefficient (ton-detik/meter)
Single pile	$k_x = 0,262 \times 10^5$	$c_x = 0,621 \times 10^2$
Group pile	$k_{x(p)} = 1,112 \times 10^5$	$c_{x(p)} = 2,632 \times 10^2$
Pile Cap	$k_{x(z=0)} = 0$	$c_{x(z=0)} = 0$
Total	$k_{x(r)} = 1,112 \times 10^5$	$c_{x(r)} = 2,632 \times 10^2$

Tabel 7. Rangkuman Nilai Kekakuan dan Redaman Mode Rotasi

Mode Rotasi	Stiffness Coefficient (ton-meter)	Damping Coefficient (ton-detik-meter)
Single pile	$k_\theta = 0,826 \times 10^4$	$c_\theta = 0,526 \times 10^1$
Group pile	$k_{\theta(p)} = 3,323 \times 10^6$	$c_{\theta(p)} = 0,574 \times 10^4$
Pile Cap	$k_{\theta(z=0)} = 0$	$c_{\theta(z=0)} = 0$
Total	$k_{\theta(r)} = 3,323 \times 10^6$	$c_{\theta(r)} = 0,574 \times 10^4$

Tabel 8. Rangkuman Nilai Kekakuan dan Redaman Mode Crossing

Mode Crossing	Stiffness Coefficient (ton)	Damping Coefficient (ton-detik)
Single pile	$k_{x\theta} = -1,02 \times 10^4$	$c_{x\theta} = -0,14 \times 10^2$
Group pile	$k_{x\theta(p)} = -6,17 \times 10^5$	$c_{x\theta(p)} = -1,34 \times 10^3$
Pile Cap	$k_{x\theta(z=0)} = 0$	$c_{x\theta(z=0)} = 0$
Total	$k_{x\theta(r)} = -6,17 \times 10^5$	$c_{x\theta(r)} = -1,34 \times 10^3$

E. Hasil Analisis Keamanan Fondasi Mesin

Setelah diketahui nilai kekakuan dan redaman masing-masing mode, dicek pula nilai frekuensi yang terjadi, apakah terjadi resonansi atau tidak. Dari hasil analisis, diketahui bahwa frekuensi mesin tidak sama dengan frekuensi natural yang terjadi antara tanah dan fondasi, sehingga fondasi aman dari resonansi. Namun, untuk nilai amplitudo mode vertikal dan horizontal tidak aman karena melebihi batas izin. Rangkuman hasil

analisis metode Novak dan El-Sharnouby(1983) dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Keamanan Fondasi Mesin metode Novak dan El-Sharnouby(1983)

Mode	Dam ping Ratio	Natu- ral Fre- quency (Hz)	Cek reso- nansi	Ampli- tudo (cm)	Syarat aman ampli- tudo	Cek am- plitu- do
Verti- kal	0,11	21,022	Safe	$2,6 \times 10^{-4}$	4×10^{-3} s/d 6×10^{-3}	Safe
Horizo- ntal	0,09	11,785	Safe	$5,1 \times 10^{-4}$	7×10^{-3} s/d 9×10^{-3}	Safe

Mengacu pada Irsyam (2008), disusunlah matriks kekakuan global untuk memperoleh hasil dari kombinasi mode getaran yang ada. Hasil yang diperoleh adalah nilai amplitudo horizontal yang terjadi adalah sebesar 0,0007 cm. Hasil tersebut masih dalam kategori aman (nilai amplitudo dibawah 0,004 cm).

Dari hasil analisis yang didapat, penggunaan fondasi *strauss pile* aman untuk menahan gaya dinamis, baik dari segi frekuensi maupun amplitudonya. Namun, sebaiknya dalam desain selanjutnya, fondasi blok diletakkan tertanam dalam tanah agar menambah nilai kekakuan dan redaman dari fondasi mesin. Analisis *Lumped Parameter System* juga dapat diterapkan pada kasus fondasi ini.

Fondasi mesin blok dapat terletak di permukaan tanah maupun tertanam di dalam tanah. Analisis terhadap kedua jenis fondasi blok ini dapat dilakukan berdasarkan teori *elastic half space* yang mengasumsikan bahwa tanah memiliki sifat homogen, isotropik, dan *semiinfinite*.

Apabila dalam tahap perhitungan fondasi blok yang tidak tertanam mengalami amplitudo getaran dan frekuensi yang besar, maka solusinya dapat dipilih alternatif fondasi mesin blok tertanam dalam tanah. Tujuannya adalah untuk memperkecil amplitudo dan frekuensi natural sistem tanah-fondasi yang terjadi pada sistem fondasi mesin. Walaupun nilai kekakuan dan redaman fondasi blok (*pile cap*) pada kasus mesin genset ini bernilai nol, namun sistem fondasi terbantu dengan adanya fondasi tiang.

Analisis selanjutnya dilakukan untuk mengetahui pengaruh fondasi blok tertanam dengan *pile* dan fondasi blok tertanam tanpa *pile*. Dengan analisis yang sama seperti analisis kondisi pertama, rangkuman hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Rangkuman Nilai Keamanan Fondasi Mesin dilihat dari Nilai Frekuensi

Jenis Fondasi	Natural Frequency (fn) (Hz)	Machine Frequency (fmachine) (Hz)	Resonance
Fondasi eksisting (<i>group pile</i> +blok tidak tertanam)	20,077	25	*Safe
Fondasi <i>group pile</i> dengan	13,305	25	Safe

blok tertanam				
Fondasi blok tertanam tanpa <i>group pile</i>	10,628	25	Safe	

Tabel 11. Rangkuman Nilai Keamanan Fondasi Mesin dilihat dari Nilai Amplitudo

Jenis Fondasi	Vertical Amplitude	Horizontal Amplitude	Check amplitude (0,004-0,006cm)
	(cm)	(cm)	
Fondasi eksisting (<i>group pile</i> +blok tidak tertanam)	$2,6 \times 10^{-4}$	$7,1 \times 10^{-4}$	Safe
Fondasi <i>group pile</i> dengan blok tertanam	$1,8 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-4}$	Safe
Fondasi blok tertanam tanpa <i>group pile</i>	$1,9 \times 10^{-1}$	$3,3 \times 10^{-1}$	Not Safe

Dari hasil analisis didapat bahwa fondasi eksisting cukup aman dalam menahan beban dinamis, namun *natural frequency* yang terjadi hampir sama dengan frekuensi mesin yang berpotensi terjadinya resonansi. Untuk analisis fondasi dengan blok tertanam, cukup efektif dalam merunkan nilai frekuensi natural sehingga dalam jangka panjang fondasi mesin cenderung lebih aman. Dari segi amplitudo tidak jauh berbeda dengan perhitungan sebelumnya. Untuk *trial* analisis ketiga, jika digunakan fondasi *block* tertanam saja tanpa *group pile* menunjukkan bahwa frekuensi natural lebih kecil, namun fondasi sangat tidak aman karena nilai amplitudo yang terlampaui tinggi.

3. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis data dalam penelitian ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Dari pengolahan data laboratorium dan data lapangan didapatkan jenis tanah pasir lempungan (SC) nilai parameter dinamik berupa nilai modulus geser G_{max} sebesar 7,144 MPa dan angka poisson 0,25.
- Analisis fondasi mesin dilakukan dengan tiga kondisi dengan menerapkan metode *Lumped Parameter System*. Kondisi pertama adalah kondisi eksisting dimana fondasi blok tidak tertanam dalam tanah. Dari hasil analisis kondisi ini didapatkan nilai frekuensi natural 20,077 Hz, masih aman dari resonansi. Nilai amplitudo vertikal yang didapat adalah sebesar $2,6 \times 10^{-4}$ mm. dan amplitudo horizontal $7,1 \times 10^{-4}$ mm juga aman.
- Pada kondisi kedua dicek pengaruh fondasi blok tertanam dan dihasilkan nilai frekuensi natural yang lebih kecil yakni 13,305 Hz dan aman terhadap resonansi. Nilai amplitudo yang didapat juga lebih kecil yakni $1,8 \times 10^{-4}$ mm. untuk amplitudo vertikal dan $6,5 \times 10^{-4}$ mm untuk amplitudo horizontal. Fondasi pada kondisi kedua aman.

- Pada kondisi terakhir dianalisis fondasi blok tertanam tanpa menggunakan pile untuk mengetahui pengaruh pile pada sistem fondasi mesin. Walaupun dari hasil analisis didapat nilai frekuensi natural yang lebih kecil yakni sekitar 10,628 Hz, namun dilihat dari nilai amplitudo vertikal sebesar $1,9 \times 10^{-1}$ mm dan amplitudo horizontal $3,29 \times 10^{-1}$ mm, sehingga fondasi mesin tanpa pile ini tidak aman.

Daftar Pustaka

- ASTM D 422-63. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 423-66. *Method of Test for Liquid Limit of Soils*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 424-74. *Standard Test Method for Plastic Limit and Plasticity Index of Soils*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 427-74. *Standard Test Method for Shrinkage Limit of Soils*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 854-02. *Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 2216-71. *Method for Determination of Water (Moisture) Content of Soil by Microwave Oven Heating*. United States: Association of Standard Testing Material.
- ASTM D 2850-95. *Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils*. United States: Association of Standard Testing Material.
- Bowles, E Joseph, 1982. *Foundation Analysis and Design*. Singapore: Mc Graw-Hill.
- Bowles, E Joseph dan J.K. Hainim, 1984. *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Das, Braja M., 1993. *Principles of Soil Dynamics*. USA: PWS-KENT Publishing Company.
- Hammam, A.H. and M.Eliwa, 2013. *Comparison Between Result of Dynamic & Static Moduli of Soil Determined by Different Methods*. HBRC Journal. Elsevier, pp.144-149
- Hardin, B.O. and Black, W.L., 1969. Closure to vibration modulus of normally consolidated clays. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, vol. 95, no. SM6, pp. 1531-1537.
- Hardin, B.O., and Drnevich, V.P., 1972. Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE 98 (SM7), pp.667-692.
- Hardin, B.O. and Richart, F.E. Jr., 1963. Elastic wave velocities in granular soils. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, vol. 89, no. SM1, pp. 33-65.
- Hasancebi N., and Ulusay R. 2007. Empirical correlations between shear wave velocity and penetration resistance for ground shaking

- assessments. *Bull Eng Geol Environ* 66(2):203–213.
- Imai T., and Yoshimura Y., 1975. The relation of mechanical properties of soils to P and S-wave velocities for ground in Japan. *Technical note OYO Corporation*.
- Irsyam, M., Andhika S., & Helmy D., 2008. *Dinamika Tanah dan Fondasi Mesin*. Bandung: Penerbit ITB.
- Jinan Z., 1987. Correlation between seismic wave velocity and the number of blow of SPT and depth. *Journal of the Chinese J Geotech Eng*, ASCE, pp. 92-100.
- Novak, M., and Beredugo, Y.O., 1972. Vertical Vibration of Embedded Footings, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.98, No.SM12, pp. 1291-1310
- Novak, M., and El-Sharnouby, B., 1983. Stiffness and Damping Constant of Single Pile, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.109, No.GT7, pp. 961-974
- Novak, M., and Howell, J.F., 1977. Torsional Vibration of Pile Foundations, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.4, pp. 449-471.
- Rix, G.J. and Stokoe, KHII., 1991, Correlation of initial tangent modulus and cone penetration resistance, *Proc, 1 st International Symposium on Calibration Chamber Testing/ ISOCCTI*, Postdam, New York, A.-B. Huang, ed., 351-362.
- Srinivasulu, P. and C.V. Vaidyanathan, 1976. *Handbook of Machine Foundation*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd.